

东南大学电工电子实验中心

实 验 报 告

课程名称： 模拟电子电路实验

第五次实验

实验名称： 三极管放大电路基本性能的测量

院（系）： 电气工程学院 专 业： 电气工程及其自动化

姓 名： 王皓冬 学 号： 16022627

实 验 室： 401 实验组别：

同组人员： 实验时间： 2024 年 4 月 30 日

评定成绩： 审阅教师：

一、实验目的

- (1) 掌握单级三极管放大电路的工作原理、电路设计、安装和调试；
- (2) 了解三极管各项基本参数的意义、选择器件的注意事项；
- (3) 理解三极管偏置电路的基本概念，掌握静态工作点的调试和测量方法；
- (4) 掌握三极管放大电路输入阻抗、输出阻抗、增益等的基本概念以及测量方法。

二、实验原理

1. 基本概念

三极管放大电路是利用双极型器件或场效应器件的控制特性，将输入小信号线性放大到所需数值的电路。双极型器件有三种基本组态：共发射极电路、共基极电路和共集电极电路，场效应管也有三种基本组态：共源极电路、共栅极电路以及共漏极电路。

三极管放大电路一般需要研究分析两种特性：静态特性和动态特性。静态特性是指三极管放大电路为了正常工作而构建的静态工作点，包括三极管各电极之间的电压、电极中流过的电流。工作点设置是否合适，将影响到放大电路的动态性能指标，甚至会导致放大电路不能工作。动态特性一般包括放大电路的放大倍数、输入电阻、输出电阻、动态范围、频带宽度等，这些特性是衡量一个放大电路性能好坏的重要指标。

双极型三极管有多种分类方式，按制作的材质可以分为：硅管、锗管；按结构可分为：NPN 管、PNP 管；按三极管的功能可以分为：开关管、功率管、达林顿管、光敏管等；按三极管的功率大小可以分为：小功率管、中功率管、大功率管；按照三极管的工作频率可以分为：低频管、高频管、超频管；按三极管的结构工艺可以分为：合金管、平面管；按照其封装方式可以分为：插件三极管、贴片三极管。

不同的三极管有着各自不同的特性及其应用场合，选择合适的三极管是放大电路实现所需要功能的保证，通过查阅对应型号的器件数据手册可以获得所用器件的性能。如本实验选用的 9013 三极管，是以硅材料制作的 NPN 型小功率三极管，其部分参数如表 2-10-1 所示。

表 2-10-1 三极管 9013 器件部分数据表

参数符号	测量条件	参数值	参数意义及设计时应该如何考虑
BV_{CBO}	$I_C=100\mu A, I_E=0$	40 V	击穿电压,超过这个电压三极管就可能被击穿
BV_{CEO}	$I_C=1\text{ mA}, I_B=0$	20 V	
BV_{EBO}	$I_E=100\mu A, I_C=0$	5 V	
I_{CBO}	$U_{CB}=25\text{ V}, I_E=0$	100 nA	集电结反向电流
I_{EBO}	$U_{EB}=3\text{ V}, I_C=0$	100 nA	发射结反向电流
h_{FE}	$U_{CE}=1\text{ V}, I_C=50\text{ mA}$	典型值 120 倍	直流电流增益
$V_{CE}(\text{sat})$	$I_C=500\text{ mA}, I_B=50\text{ mA}$	典型值 0.16 V 最大值 0.6 V	集电极—发射极饱和压降
$V_{BE}(\text{sat})$	$I_C=500\text{ mA}, I_B=50\text{ mA}$	典型值 0.91 V 最大值 1.2 V	基极—发射极饱和压降
$V_{BE}(\text{on})$	$U_{CE}=1\text{ V}, I_C=10\text{ mA}$	最小值 0.6 V 典型值 0.67 V 最大值 0.7 V	基极—发射极导通电压

表 2-10-1 表示了三极管 9013 在 25℃ 室温环境下的部分电气特性，完整的数据手册可以扫描二维码查看。

2. 分压式偏置共发射极放大电路工作原理

以 9013 为核心的分压式偏置共发射极放大电路如图 2-10-1 所示。

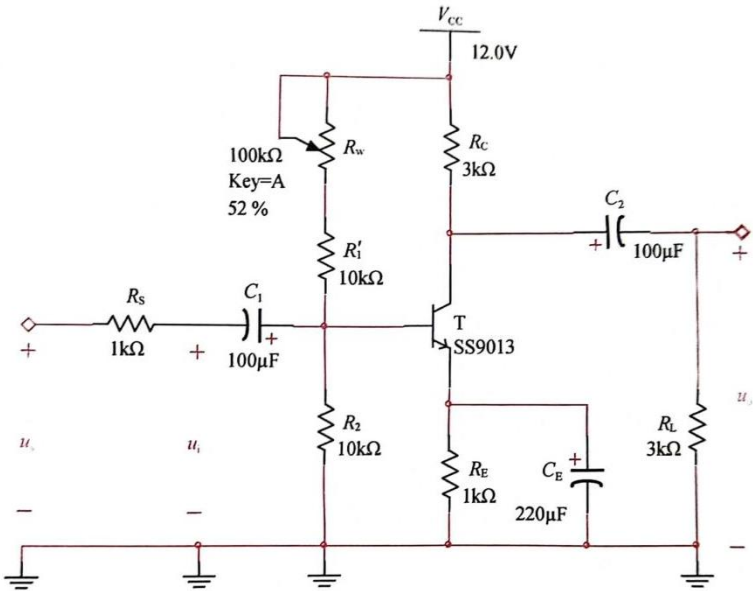


图 2-10-1 分压式偏置共发射极放大电路

其中:由 R_w 和 R'_1 串联构成的电阻 R_1 称为“上偏置电阻”, R_2 称为“下偏置电阻”, R_1 和 R_2 构成分压式偏置方式,为三极管 T 提供静态偏置, R_E 为发射极电阻,和发射极旁路电容 C_E 一起用于稳定电路的静态工作点。信号源电压 u_s , 经过信号源内阻 R_S (由于信号源内阻非常小,

为了测试输入电阻而特地加入 R_S ，模拟信号源内阻, 其余情况这个电阻 R_S 一概省略)后成为放大电路的输入信号 u_i ，由输入耦合电容 C_1 将该信号传递给三极管输入端进行放大, 由集电极电阻 R_C 将变化的集电极电流转换成变化的电压, 通过输出耦合电容 C_2 ，再将变化的电压输出到负载 R_L 上, 完成了信号由输入到输出的放大, 其中放大的实现是由三极管的控制作用完成的。

即:

$$u_s \xrightarrow{R_S} u_i \xrightarrow{C_1} u_{be} \rightarrow i_b \rightarrow i_c(\beta i_b) \rightarrow i_c R'_L \rightarrow u_c \xrightarrow{C_2} u_o$$

三、预习思考

1. 为何实验中的输入信号频率要选取 1kHz?

思考：频率过低时，耦合电容、旁路电容的影响不可忽略；频率较高时，混合 π 模型中的各极寄生电容不可忽略。

四、实验内容

1. 实验要求

以图 2-10-1 电路为例, 完成静态工作点的测量, 动态参数的测量, 三极管放大电路输入和输出电阻的测量。

(1) 静态工作点的测量

静态也叫直流工作状态, 是指电路在没有外加交流信号, 仅有直流电源供电状态下三极管的电压和电流。一般指三极管的集电极电流 I_C , 集电极-发射极电压 U_{CE} , 基极电流 I_B 和基极-发射极电压 U_{BE} 。在实际应用时, 一般以测量 I_C 和 U_{CE} 两个参数为主。

(2) 动态参数的测量

动态也叫交流工作状态, 是指三极管在直流工作状态(静态工作点)下, 当外加交流信号作用时, 测量输出交流信号幅度的大小, 输出波形是否出现失真、最大输出幅度等。

(3) 输入和输出电阻的测量

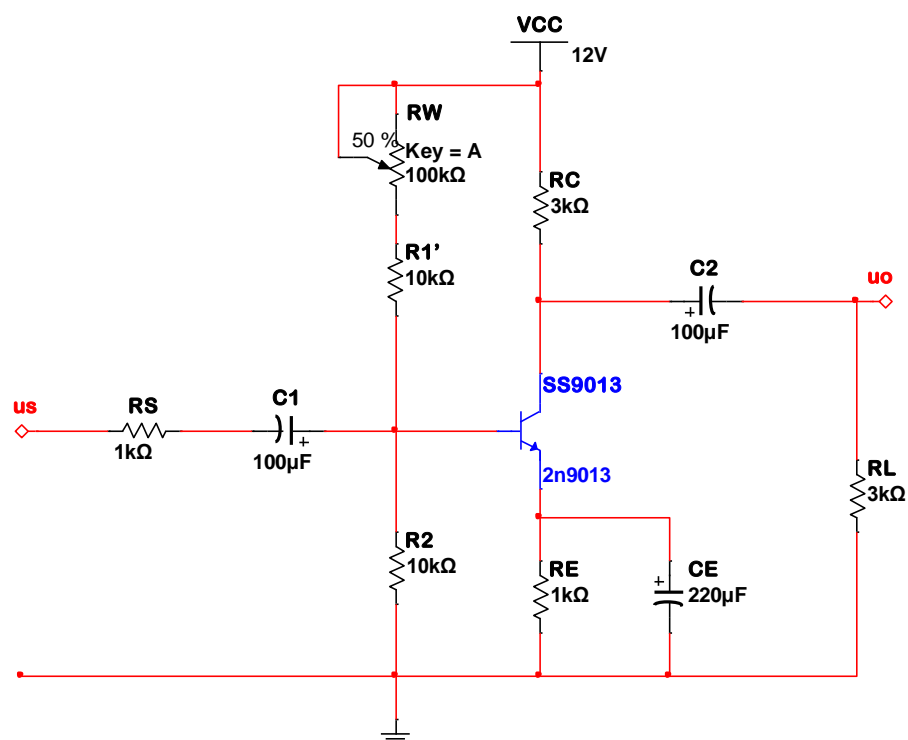
输入电阻反映了一个放大电路对信号源信号的获取能力, 针对不同的信号源特性需要设计不同大小的输入电阻。一般而言, 针对电压源特性的信号, 其等效内阻比较小, 所以希望放大电路的输入电阻尽可能大些; 而针对电流源特性的信号, 其等效内阻比较大, 设计的放大电路输入电阻应尽量小些。输出电阻反映了一个放大电路带负载能力的大小, 当放大电路以电压源形式输出时, 希望放大电路的输出电阻尽可能小, 放大后的信号电压能更多地输出在负载上; 当放大电路以电流源形式输出时, 所设计的放大电路的输出电阻就需要尽可能大。

2. 仿真实验

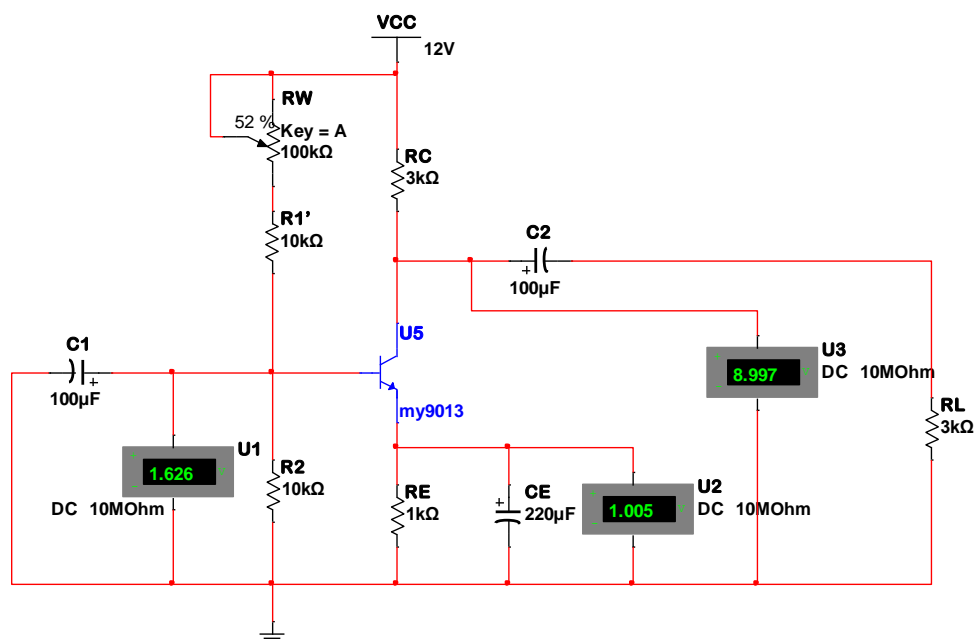
(1) 静态工作点的测量

输入端到地短接, 注意去掉 R_S ，用直流电压表测量对应点电压, 如下图所示, 通过调整上偏置电阻中的 R_W 值, 使得发射极电阻 R_E 上的电压值为 1V 左右。

仿真电路原理图如下。



具体仿真测量参数如下。



由 3 个电压表测量值可以得到对应的静态工作点的电压、电流值为：

$$I_{CQ} = \frac{U_{EQ}}{R_E} = \frac{1.005V}{1k\Omega} = 1.005mA$$

$$U_{CEQ} = U_{CQ} - U_{EQ} = 8.997V - 1.005V = 7.992V$$

$$U_{BEQ} = U_{BQ} - U_{EQ} = 1.626V - 1.005V = 0.621V$$

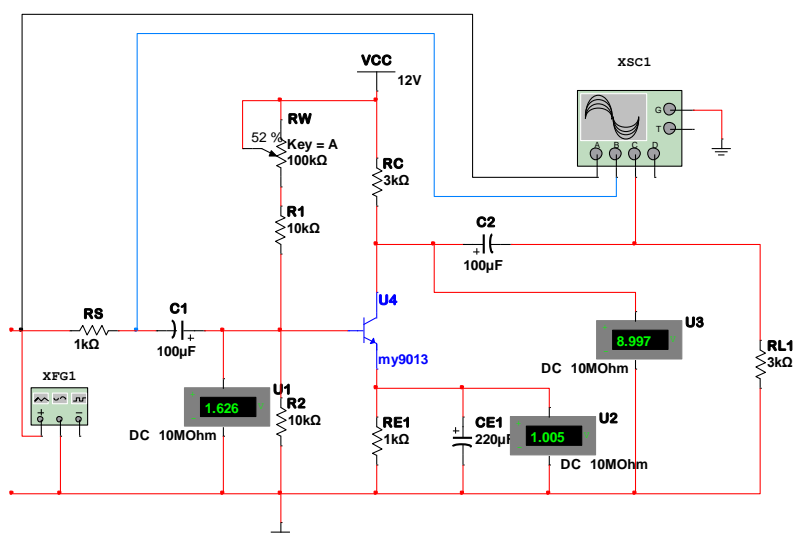
查看Multisim中 SS9013 三极管的 $\beta = 200$, 则

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} = \frac{1.005mA}{200} = 5.025\mu A$$

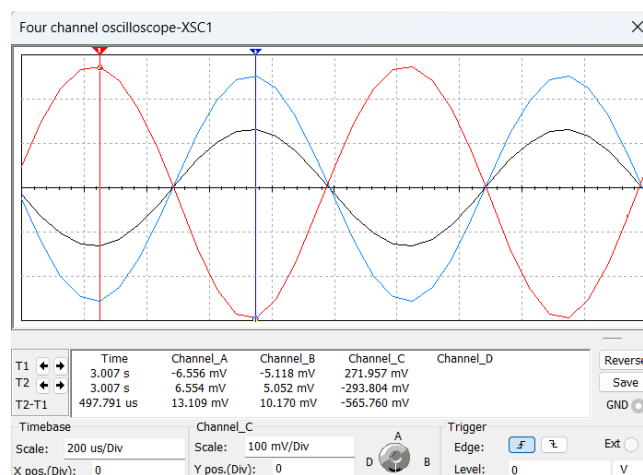
(2) 放大电路动态参数的测量

输入端加上信号源,用四通道示波器的通道 A 连接信号源,通道 B 连接电路的输入端,通道 C 连接电路的输出端,如图 2-10-3 所示。连接好电路后开始仿真。信号源的设置如图 2-10-4 所示,波形选择正弦波,频率选择 1kHz,不断调整信号源幅度,同时观察示波器的 B 通道,使 u_i 峰峰为 10mV 左右时停止调节,信号源峰值为 6.6mV。如图 2-10-5 中可以观察到 A 通道(u_s)峰峰值为 12.997mV,示波器 B 通道(u_i)峰峰值为 10.071mV,此时放大电路的输出(u_o)如示波器 C 通道所示,其峰峰值为 562.812mV。测试过程中观察示波器,确保信号不失真,同时也在示波器上看到,输出信号和输入信号是反相的,验证了三极管共发射极放大电路实现反相放大的特性。

搭接交流电路图仿真图如下。



对应仿真结果如下。(黑-A- u_s , 蓝-B- u_i , 红-C- u_o)



由以上测量参数可以得出:

电路的放大倍数为(以峰峰值数据计算):

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{565.760\text{mV}}{10.170\text{mV}} = -55.63$$

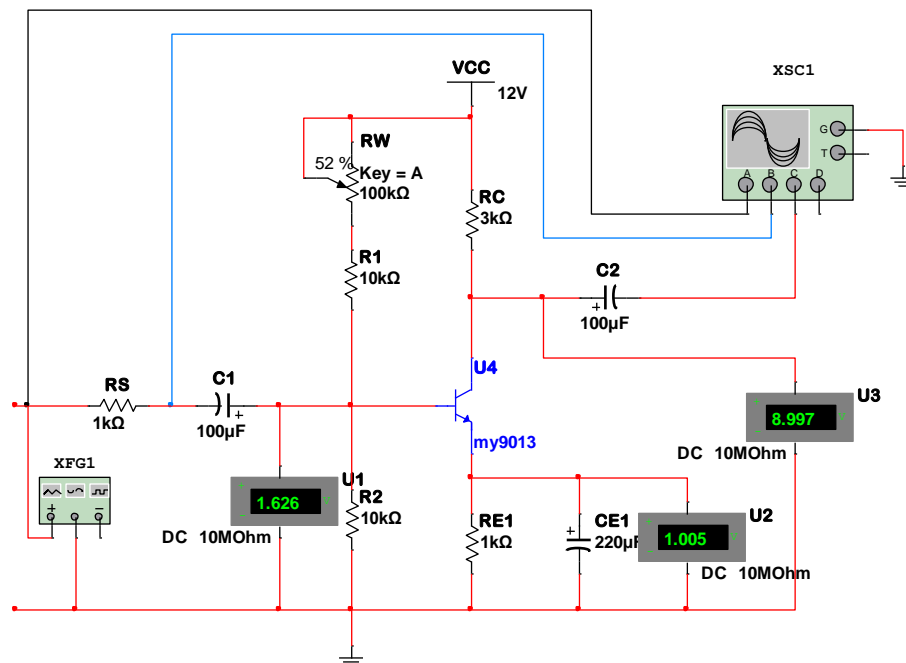
源电压放大倍数为：

$$A_{us} = \frac{U_o}{U_s} = -\frac{565.760\text{mV}}{13.109\text{mV}} = -43.16$$

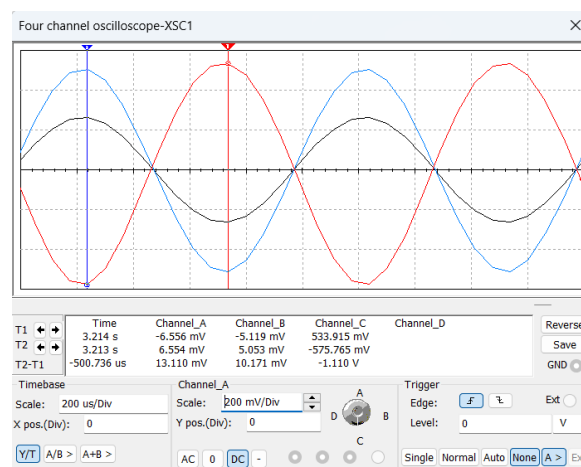
放大电路的输入电阻为

$$R_i = \frac{U_i}{U_s - U_i} R_s = \frac{10.170\text{mV}}{13.109\text{mV} - 10.170\text{mV}} \times 1\text{k}\Omega = 3.46\text{k}\Omega$$

为了测量电路的输出电阻，把负载电阻 R_L 开路，测量此时的输出电压（ U'_o ）的峰峰值为1110mV，如下图所示。



对应仿真结果如下。（黑-A- u_s ，蓝-B- u_i ，红-C- u_o ）



所以可得放大电路的输出电阻为：

$$R_o = \frac{U'_o - U_o}{U_o} R_L = \frac{1110\text{mV} - 565.760\text{mV}}{565.760\text{mV}} \times 3\text{k}\Omega = 2.89\text{k}\Omega$$

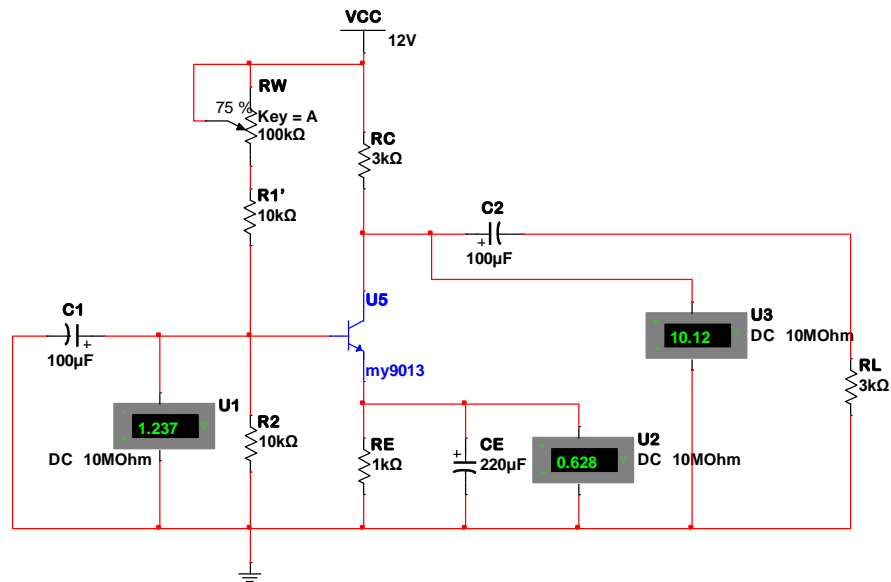
(3) 工作点的改变对电路性能的影响

通过调整上偏置电阻中的 R_W 值,可以得到不同的静态工作点。参照上述类似方式,测量相应的静态工作点的参数以及对应的动态性能指标,分析研究静态工作点对放大电路动态性能的影响。

增大 R_W 至 75%:

1. 静态工作点的测量

测量电路如图。



由 3 个电压表测量值可以得到对应的静态工作点的电压、电流值为:

$$I_{CQ} = \frac{U_{EQ}}{R_E} = \frac{0.628V}{1k\Omega} = 0.628mA$$

$$U_{CEQ} = U_{CQ} - U_{EQ} = 10.12V - 0.628V = 9.492V$$

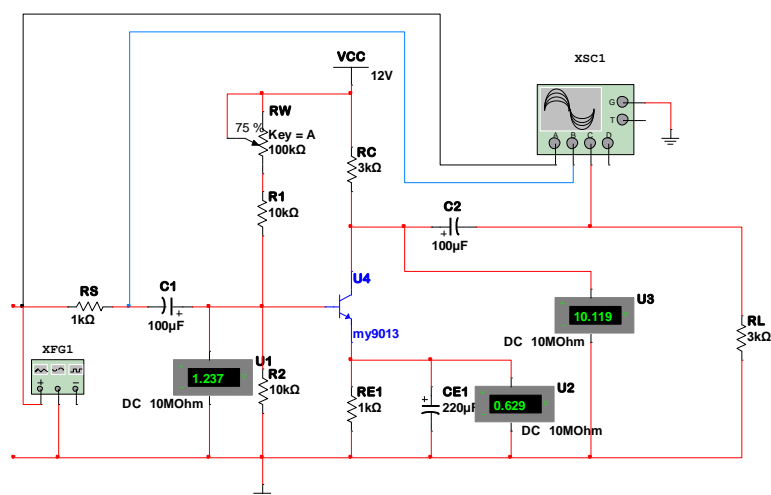
$$U_{BEQ} = U_{BQ} - U_{EQ} = 1.237V - 0.628V = 0.609V$$

查看Multisim中 SS9013 三极管的 $\beta = 200$ 则

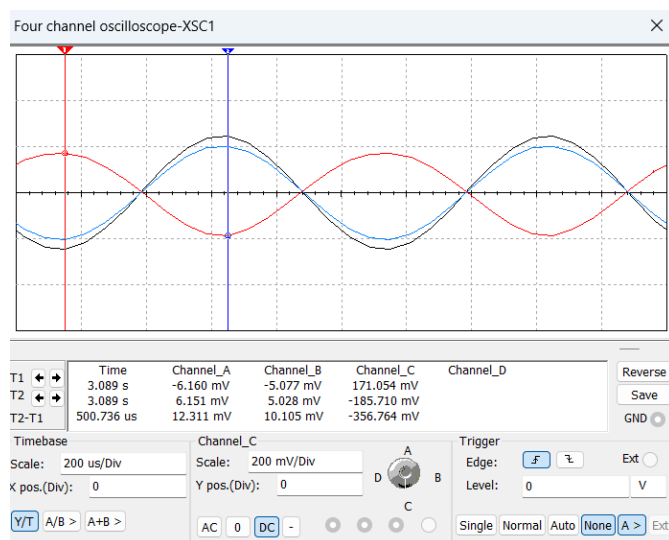
$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} = \frac{0.628mA}{200} = 3.14\mu A$$

2. 动态参数的测量

测量电路如图。



对应仿真结果如下。（黑-A- u_s ，蓝-B- u_i ，红-C- u_o ）



由以上测量参数可以得出：

电路的放大倍数为（以峰峰值数据计算）：

$$\dot{A}_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{-356.764\text{mV}}{10.105\text{mV}} = -35.31$$

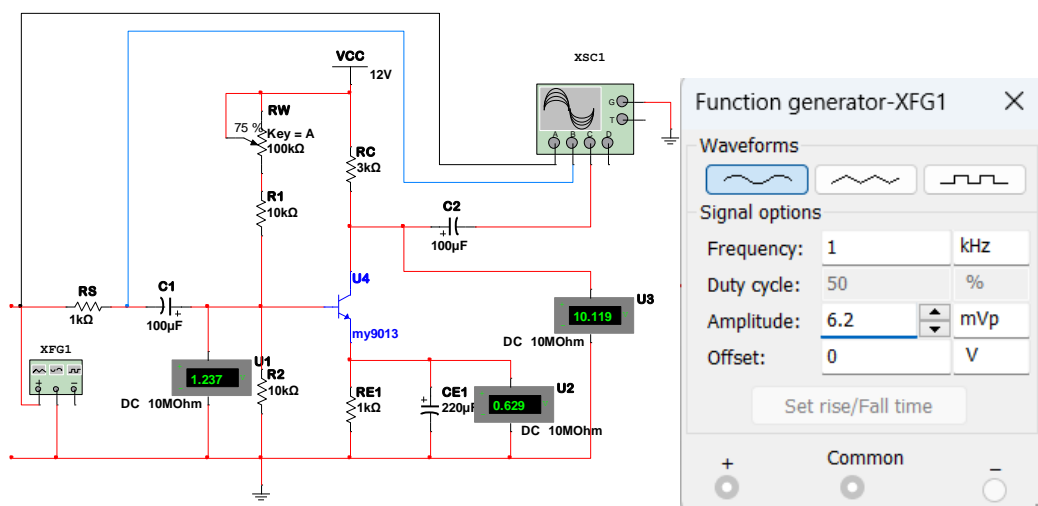
源电压放大倍数为：

$$\dot{A}_{us} = \frac{U_o}{U_s} = \frac{-356.764\text{mV}}{12.311\text{mV}} = -28.98$$

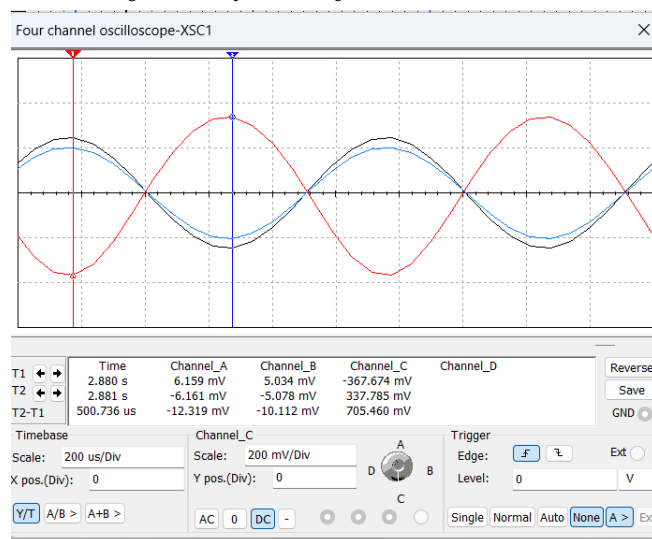
放大电路的输入电阻为

$$R_i = \frac{U_i}{U_s - U_i} R_s = \frac{10.105\text{mV}}{12.311\text{mV} - 10.105\text{mV}} \times 1\text{k}\Omega = 4.58\text{k}\Omega$$

为了测量电路的输出电阻，把负载电阻 R_L 开路，测量此时的输出电压（ U'_o ）的峰峰值为 705.460mV，如图所示。



对应仿真结果如下。（黑-A- u_s ，蓝-B- u_i ，红-C- u_o ）



所以可得放大电路的输出电阻为：

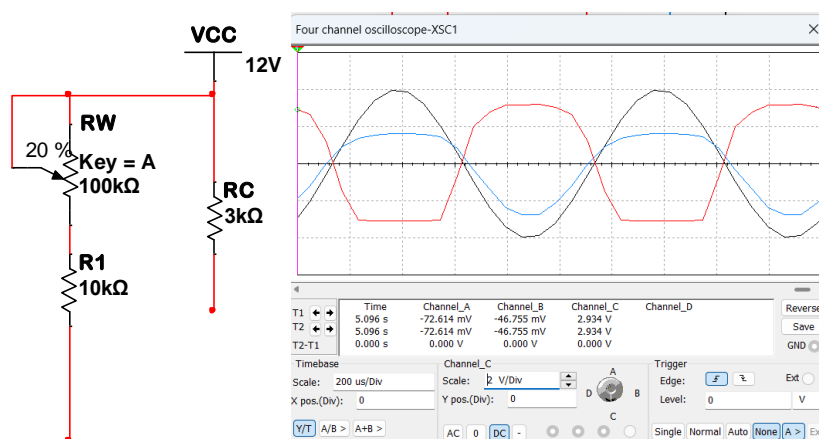
$$R_o = \frac{U'_o - U_o}{U_o} R_L = \frac{705.460\text{mV} - 356.764\text{mV}}{356.764\text{mV}} \times 3\text{k}\Omega = 2.93\text{k}\Omega$$

因此， R_W 增大后，静态工作点下移， I_{CQ} 、 I_{BQ} 均减小， A_u 、 A_{us} 的绝对值均减小，电路放大倍数减小。

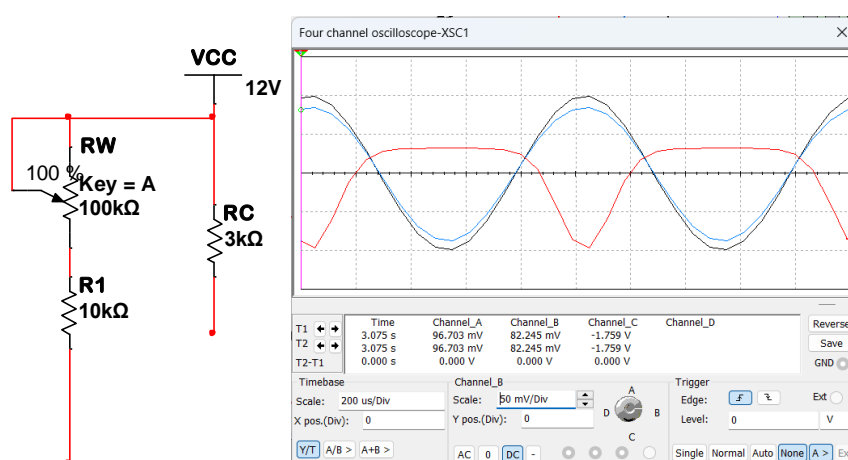
通过调整工作点，并适当加大输入信号值，观察输出波形的失真现象，分析研究工作点如果设置的不合理，会导致放大电路输出波形出现何种类型的失真？要消除失真应该如何调整电路的工作点，以及使输出信号达到最大不失真幅度时对应的工作点应该如何设置。

增大信号源输入幅值到 50mVpp。

R_W 减小，静态工作点 Q 偏高，电路出现饱和失真， u_i 顶部变形，输出波形底部近似削平：



R_W 增大，静态工作点 Q 偏低，电路出现截止失真， u_i 底部变形，输出波形顶部失真：



对上述结果进行分析。由于本实验中的电路是一个分压偏置式电路，调节 R_W 的本质是调节静态工作点的位置。 R_W 增大，三极管基极对地电压降低； R_W 减小，三极管基极对地电压升高。

而本实验电路中的增益部分是一个共射接法，其增益为负值。因此，若输出波形顶部被削平（或被压缩），说明 u_i 底部（即负半波）失真，即产生截止失真；若输出波形底部被削平，说明 u_i 顶部（即正半波）失真，即产生饱和失真。

消除失真：

欲消除失真，我们应当设置合适的静态工作点，即：基极电压合适，使得发射结正偏导通；集电极电压合适，使得 cb 间的 PN 结反偏。同时，二者都应留有较大的余量。我们还应选取合适的信号源电压幅值，使得幅值小于所留余量，而不至于触底或触顶。

最大不失真幅值对应的静态工作点：

欲调节最大不失真幅值对应的静态工作点，从理论上讲，我们应选取处于截止与饱和正中间的点作为静态工作点。为调节此静态工作点，可以采取逐次逼近的思路。

由于饱和失真容易判断，可以不断调节信号源幅值与 R_W ，使得输出波形恰不出现底部削平。观察此时的正负半波波形对称性，判断是否产生截止失真。直到输出波形恰不出现底部削平，同时正负半波近似对称，此时的静态工作点即为最大不失真幅值对应的静态工作点。

3. 电路实验

电路及元器件参数如图 2-10-1 所示，正确连接后开展实验。

(1) 工作点设置及放大电路基本性能测量

①放大电路的输入不接信号源, 去掉 R_S , 并将输入端接地, 如图 2-10-2 所示。调整 R_W , 使静态集电极电流 $I_{CQ} = 1\text{mA}$ (一般可以通过测量集电极或发射极电阻两端压降确定), 测量静态时晶体管各个电极的电压值, 将数据记入表 2-10-2 中。

易派测量数据如下。从左到右分别为 I_{CQ} , b、e、c 极电压。

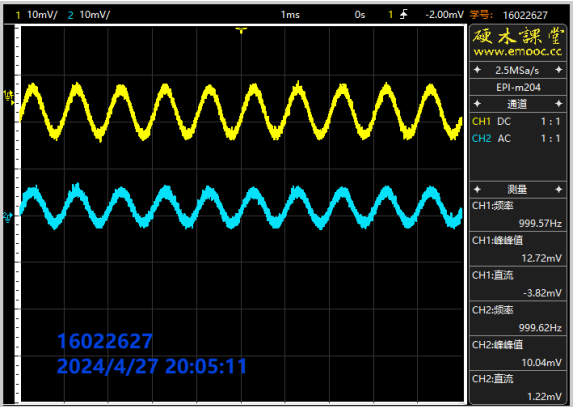


实验室测量数据如下。从左到右、从上到下分别为 I_{CQ} , b、e、c 极电压。

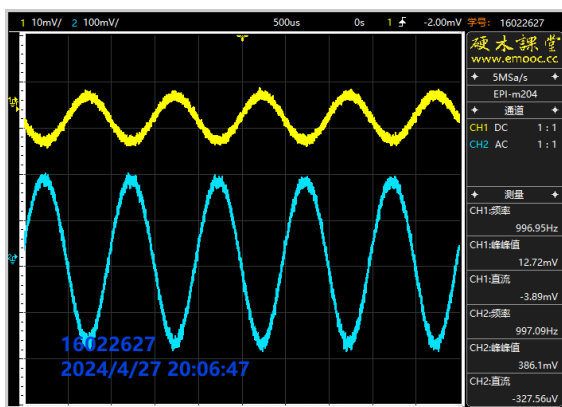


②去掉输入端的接地线并接入信号源和 R_S , 如图 2-10-3 所示, 将信号源 U_S 设置成频率为 1kHz 的正弦信号, 调整信号源输出幅度, 使放大电路输入端信号 $U_i=10\text{mV}$ (峰峰值), 测量 U_S 、 U_O 和 U'_O (负载开路时的输出电压) 的值并填于表 2-10-2 中。

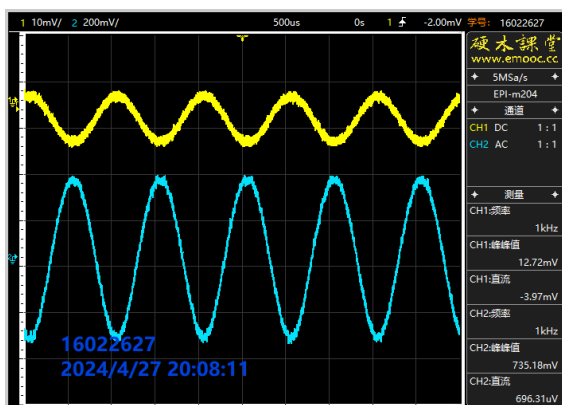
(黄- u_s , 蓝- u_i)



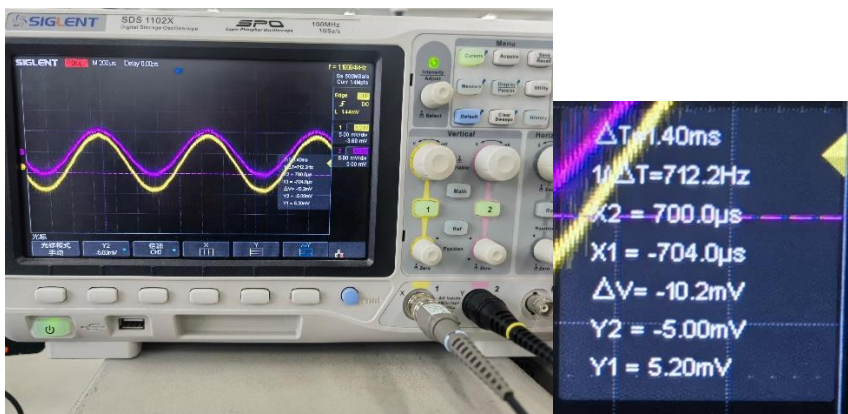
(黄- u_s , 蓝- u_o)



(黄- u_s , 蓝- u_o')



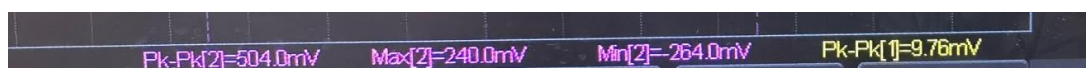
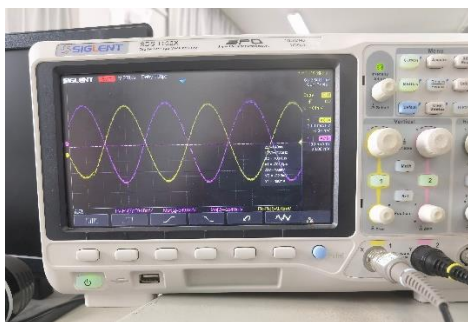
$u_i = 10\text{mV}$:



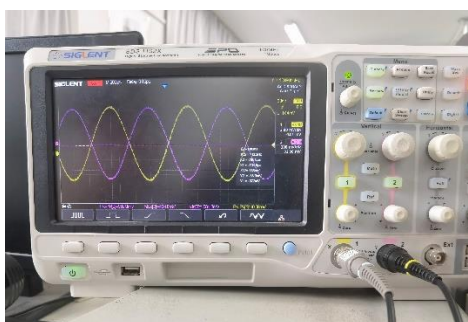
此时的 u_s :



u_o : (黄- u_s , 紫- u_o)



u_o' : (黄- u_s , 紫- u_o')

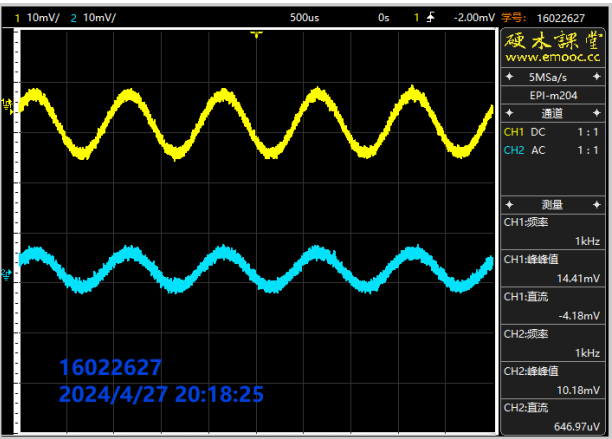


注意:用双通道示波器测量 U_o 及 U_i 的波形参数时,必须确保是在 U_o 不失真的情况下测量数据。

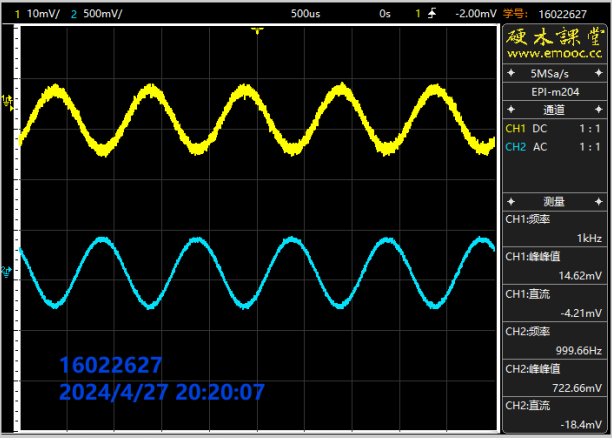
③重新调整 R_W ,使 I_{CQ} 为2mA,重复上述测量,将测量结果记入表2-10-2中。



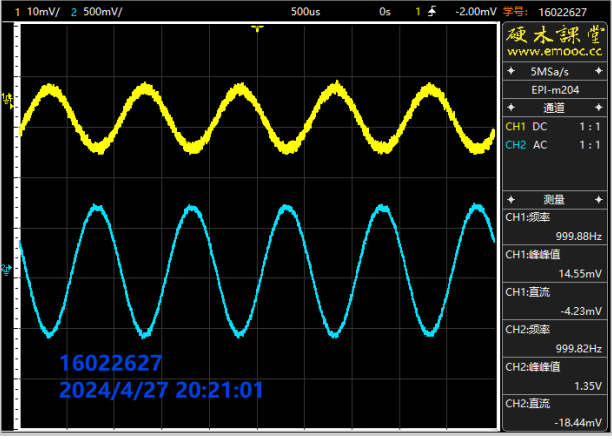
黄- u_s , 蓝- u_i



黄-us，蓝-uo



黄-us，蓝-uo'



实验室测量数据：

实验室测量数据如下。

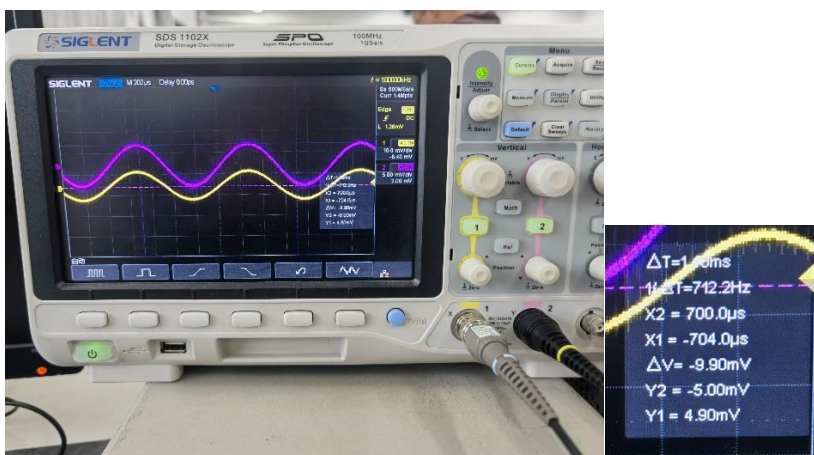
$I_{CQ} = 1mA$:

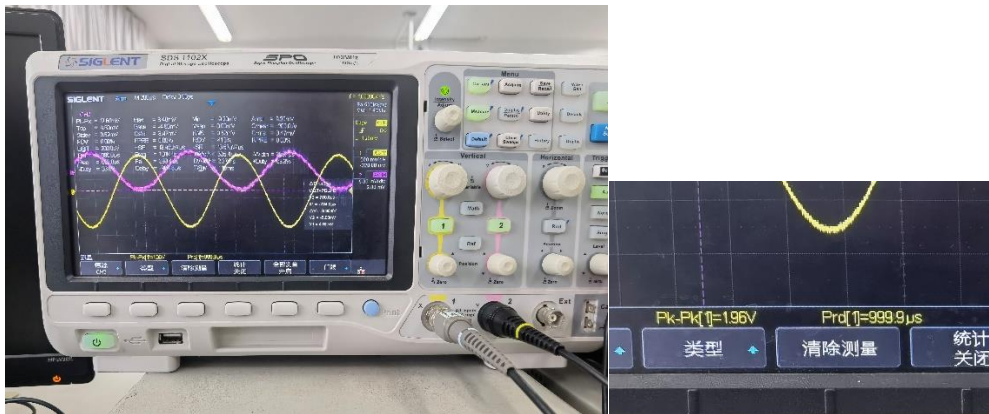


静态工作点及对应 R_W 值：（从左到右、从上到下分别为 R_W ，b、e、c 极电压）



动态参数：（从上到下分别为 u_i, u_o, u_o' ）





④根据测量结果可以计算出在不同的静态工作点时,该放大电路的放大倍数 \dot{A}_u ,源电压放大倍数 \dot{A}_{us} ,输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o ,讨论分析工作点对三极管放大电路动态指标的影响。

输入电阻、输出电阻的测量原理及方法可以参见第1章1.4.3节内容。

静态工作点电流 I_{CQ}/mA		1	2
输入端接地	U_{BQ}/V	1.613	2.639
	U_{CQ}/V	8.80	5.815
	U_{EQ}/V	1.004	2.019
输入信号 $U_i = 10mV$ (峰峰值)	U_s/mV (峰峰值)	13.2	14.0
	U_o/V (峰峰值)	0.504	1.02
	U_o'/V (空载) (峰峰值)	0.968	1.96
计算值	U_{BEQ}	0.609	0.62
	U_{CEQ}	7.796	3.796
	$\dot{A}_u = \frac{U_o}{U_i}$	-50.4	-102
	$\dot{A}_{us} = \frac{U_o}{U_s}$	-38.18	-72.86
	$R_i = \frac{U_i}{U_s - U_i} R_s/k\Omega$	3.125	2.5
	$R_o = \frac{U_o' - U_o}{U_o} R_L/k\Omega$	2.762	2.765

上表是以实验室数据为准的。

对结果进行理论分析如下。理论增益为

$$\dot{A}_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta r_e)}$$

其中， $r_e = \frac{U_T}{I_{CQ}}$ 。因此，当改变静态工作点从而改变 I_{CQ} 时，放大倍数会相应改变。同

时，由于 9013 的 r_{be} 较小，一般取 300Ω ，其相较于分母后项较小。因此，考察 I_{CQ} 变化带来的影响时，可以近似将 r_{be} 忽略不计。即：

$$\dot{A}_u \approx \frac{\beta R'_L}{U_T} \cdot I_{CQ}$$

这意味着放大倍数与 I_{CQ} 是近似成正比的。观察实验数据：

I_{CQ}/mA	1	2
$\dot{A}_u = \frac{U_o}{U_i}$	-50.4	-102
$\dot{A}_{us} = \frac{U_o}{U_s}$	-38.18	-77.27

两倍关系近似成立，这是佐证理论分析的。

输入电阻

$$R_i = r_{be} // R_1 // R_2$$

因此 I_{CQ} 变为 2mA 时， R_W 变小， R_1 变小，输入电阻会相应变小。

输出电阻

$$R_o = R_c // R_L$$

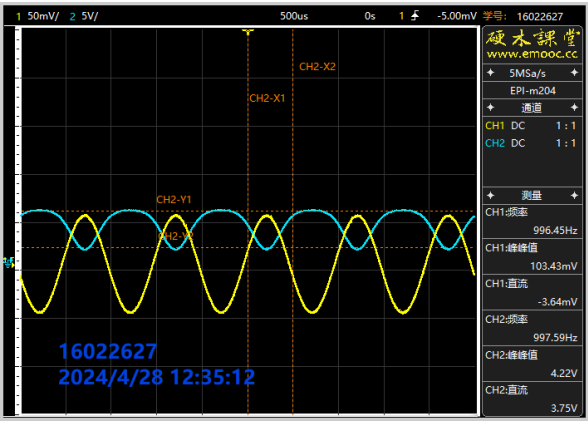
因此理论上输出电阻不变。观察实验数据：

$R_i = \frac{U_i}{U_s - U_i} R_s / k\Omega$	3.125	2.5
$R_o = \frac{U'_o - U_o}{U_o} R_L / k\Omega$	2.762	2.765

是佐证理论分析的。

(2) 观察不同的静态工作点对输出波形的影响

①适当加大输入信号幅度, 改变 R_W 的阻值, 使输出电压波形出现截止失真, 画出失真波形, 并将测量值记录于表 2-10-3 中。

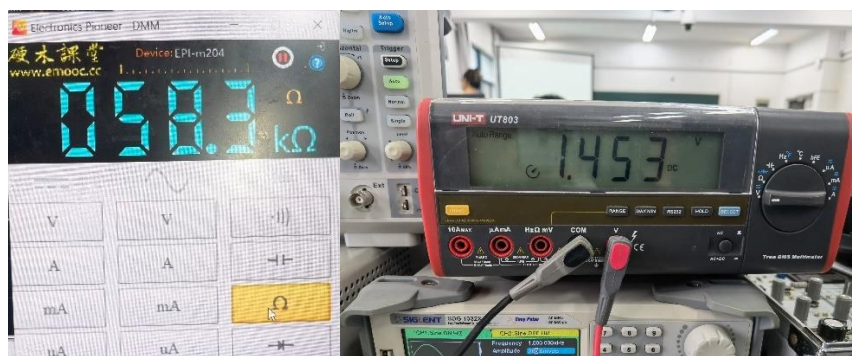




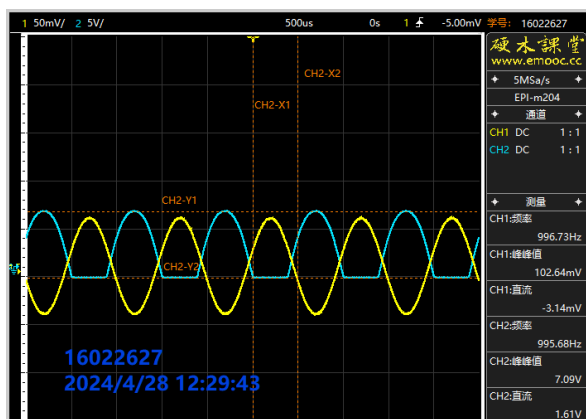
实验室测量数据如下。



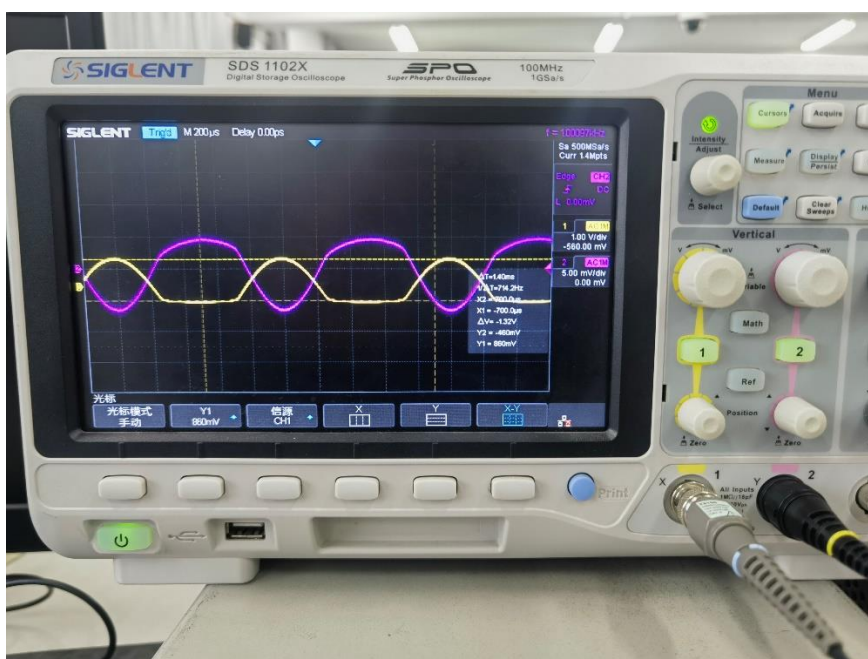
(从左到右、从上到下分别为 R_W ，b、e、c 极电压)



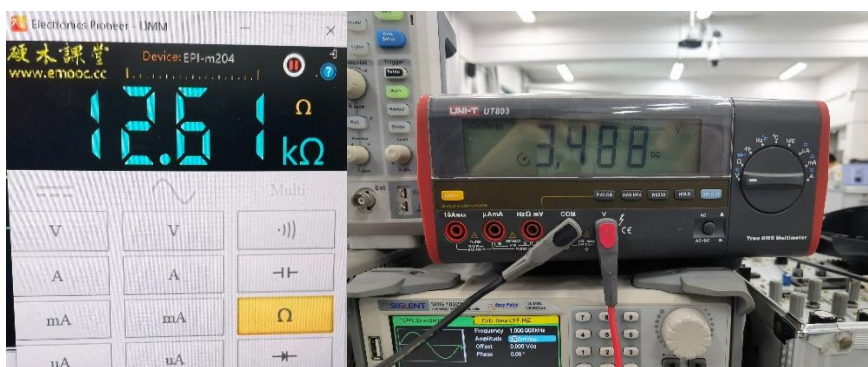
②适当加大输入信号幅度，改变 R_W 的阻值，使输出电压波形出现饱和失真，画出失真波形图，并将测量值记录在表 2-10-3 中。



实验室测量数据如下。



(从左到右、从上到下分别为 R_W 、b、e、c 极电压)



		截止失真	饱和失真	R_W 变化对失真的影响
测量值	U_{BQ}/V	1.453	3.488	R_W 增大，静态工作点 Q 降低，电路容易出现截止失真； R_W 减小，静态工作点 Q 升高，电路容易出现饱和失真
	U_{CQ}/V	9.12	3.364	
	U_{EQ}/V	0.895	2.853	
	波形	圆顶波	底部削平的正弦波	
计算值	I_{CQ}/mA	0.895	2.853	
	U_{BEQ}/V	0.558	0.635	
	U_{CEQ}/V	8.225	0.511	
	$R_1/k\Omega$	68.3	22.61	

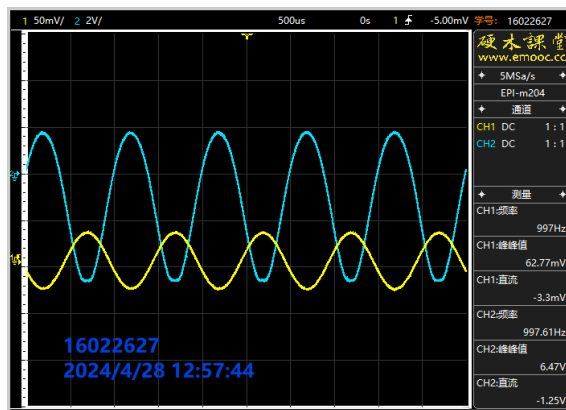
可以看到，波形符合了仿真时的波形：截止失真输出圆顶波，饱和失真输出底部削平的正弦波。

截止失真是静态工作点偏低造成的。截止失真时，b、e 极电压较小，而 c 极电压较高。此时 be 间近乎不导通，这是可以由实验数据佐证的： $U_{BEQ} = 0.558V < 0.6V$ ，与其他实验中所得的导通压降（略高于 0.6V）有明显差异。

饱和失真是静态工作点偏高造成的。饱和失真时，b、e 极电压较高，而 c 极电压较低。此时 ce 间 PN 结正偏，这是可以由实验数据佐证的： $U_{CEQ} = 0.511V < U_{BEQ} = 0.635V$ 。

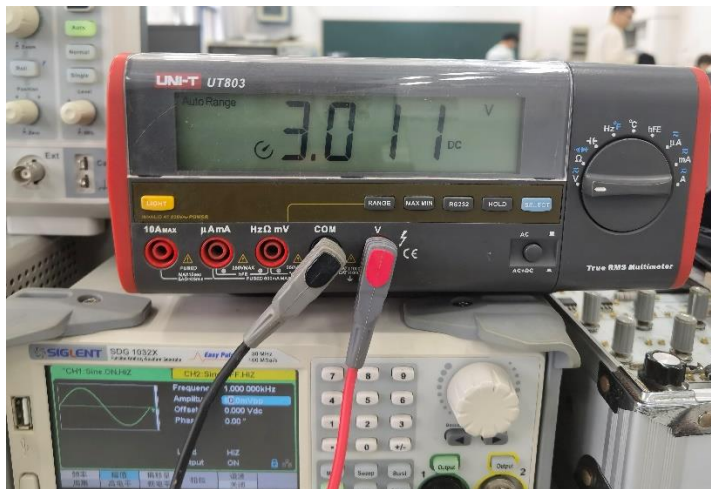
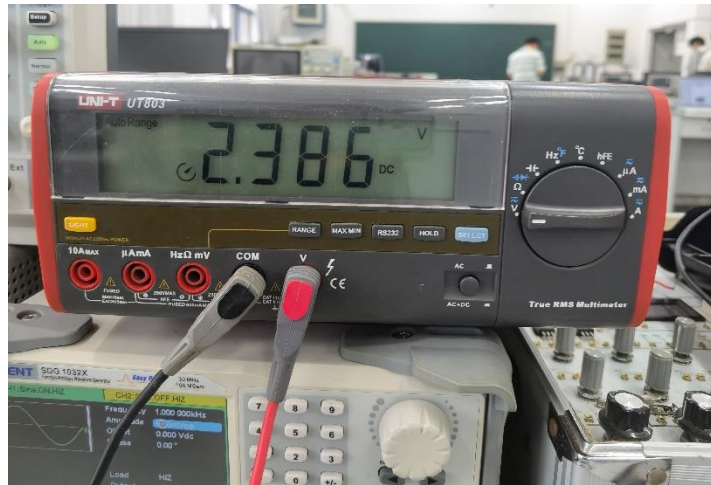
(3) 测量放大电路的最大不失真输出电压

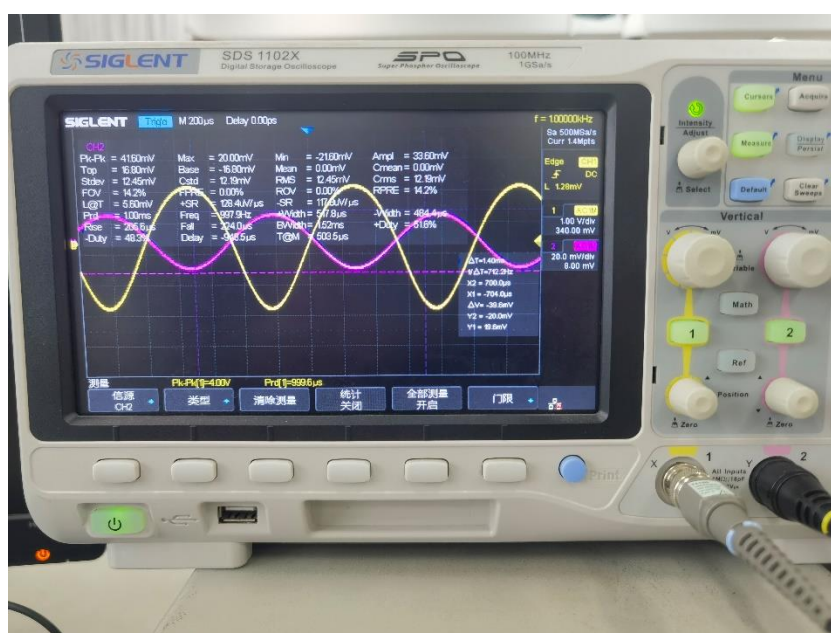
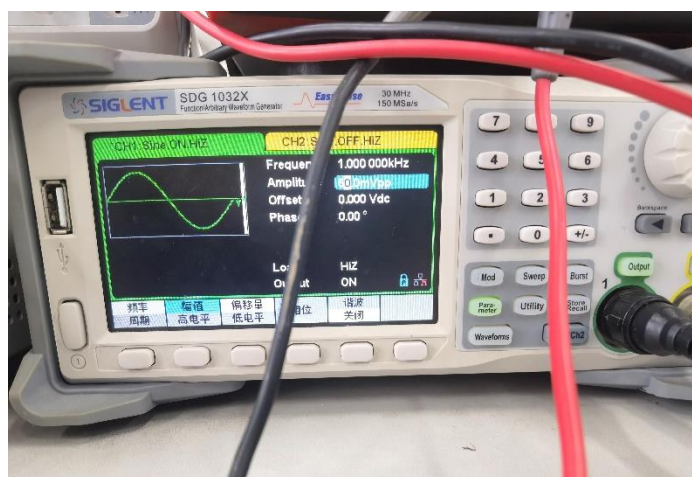
分别调节 R_W 和 U_S ，用示波器观察输出电压 U_o 的波形，使输出波形为最大不失真正弦波（即饱和失真和截止失真几乎同时出现时）。测量此时静态集电极电流 I_{CQ} 和输出电压的峰峰值 U_{OPP} ，将测量结果记录在表 2-10-4 中。



实验室测量数据如下。（从上到下分别为 R_W 、ceb 极电压）







测量值	U_{BQ}/V	3.011
	U_{CQ}/V	4.741
	U_{EQ}/V	2.386
	U_{OPP}/mV	40 (输入信号)
计算值	I_{CQ}/mA	2.386
	U_{BEQ}/V	0.625
	U_{CEQ}/V	2.355
	$R_1/k\Omega$	31.95

仿真部分已经分析过最大不失真电压的理论部分了。对实验结果进行分析。

由于实际很难观察临界点，因此，测量的时候采用的方法是连续旋转信号源输入旋钮，先确定输入信号峰峰值的区间（20mV~60mV，这两个端点时失真恰较明显），再取其平均值 40mV 附近仔细观察。最后发现 40mV 是最符合的。

此时， I_{CQ} 略大于 2mA，而 2mA 时是不失真的。 U_{BE} 也没有截止，而波形产生了略微的失真，恰处于临界点。

五、实验总结

本次实验我们研究了三极管放大电路的基本性能测量。不得不说，直到这次实验我才充分见识到，为何模电实验比数电实验更加困难。

这次实验的难点很多。首先是电路数据的精确。本次实验电阻可以像往常一样精确，但电容误差非常明显，标称值为 $100\mu\text{F}$ 的电容实测容值均超过了 110。且大电容很少，这使得电容的参数值无法精确。这次实验对电容要求尚不高，下次实验就很难说了。

其次是波形的读取。由于输入电压太小，无论是易派的示波器还是实验室的示波器都很难准确读取 “ $u_i = 10\text{mV}$ ” 的静态工作点。

另外，本次实验由于器件问题，前期排查了很久电路而没有发现错误。所以虽然验收完成了，实际上实验的部分留到了 12 点才完成。